

## 次期技術試験衛星ホールスラストサブシステムと開発計画

Development Plan of Hall Thruster Sub-system for  
Next Generation Engineering Test Satellite

○杵淵 紀世志（宇宙航空研究開発機構），  
JAXA ホールスラスト研究開発チーム

○Kiyoshi Kinefuchi (JAXA)  
and  
JAXA Hall Thruster R&D Team

## Abstract

In 2015, the world's first all-electric satellite developed by Boeing was successfully arrived at GEO. Hall thrusters tend to be used for all-electric satellites as it can offer robust and low cost propulsion system and quick transfer to GEO. Following this trend, Airbus DS will launch an all-electric satellite with Hall thrusters in 2017. JAXA considers development of all-electric satellite as the Next Generation Engineering Test Satellite which has domestic 6-kW-class Hall thruster system for both orbit raising and station keeping. This article shows the outline of the Hall thruster sub-system for the Next Generation Engineering Test Satellite and summarizes its development plan.

## 1. はじめに

2012年のBoeingの全電化静止衛星バス702SPの受注発表、2015年の静止軌道への投入成功もあり、世界的に全電化衛星の開発が活発化している。軌道上昇および軌道維持等に用いられる電気推進には、世界的なトレンドとして5kW級のホールスラストが採用される見込みである<sup>1)</sup>。日本においても次期技術試験衛星として、全電化衛星の検討を進めており、平成33年度にH3ロケットにて打ち上げる計画となっている<sup>2)</sup>。ここには、図1に示す国産の6kW級ホールスラストが搭載される<sup>3)</sup>。本稿では、ホールスラストシステムに関し、まず海外動向を俯瞰した上で採るべき戦略を議論し、現在JAXAにおいて検討を進めている6kW級ホールスラストサブシステムとその開発計画について概観する。

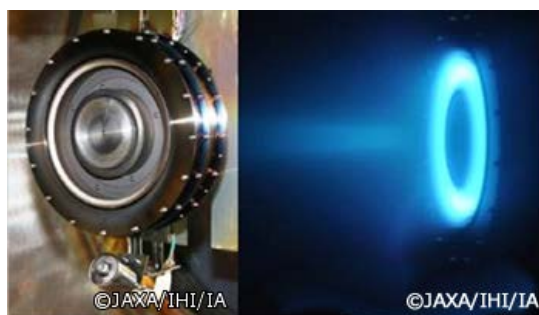


図1 国産6kW級ホールスラスト

## 2. 海外動向

表1に各国の静止電気推進バスの開発動向をまとめる。Boeingに続き、2017年にはAirbus DSもEurostar E3000 EORにてホールスラストのみによるO/Rを行う計画である。Eurostar E3000 EORの全電化推進系はSPT-140が4基、PPS-5000が1基で構成され、前者は進展ブーム上に、後者は衛星筐体に搭載される。電力制御器(PPU)は両スラストを駆動可能なTAS-B (Thales Alenia Space Belgium)のMk3が3基搭載されている。SSL (Space Systems Loral)、TAS、OHBもこれに続き全電化バスの初号機を打ち上げる計画となっており、いずれもホールスラストを搭載する。バスの規模としては、702SPの打上げ時2トン、発生電力8kWに留まらず、5~6トン、25~30kW級の開発が欧米で進められている。

702SPではロケット分離から静止化まで約半年の遷移期間を要したが、主としてこれを短期化する観点から、推力電力比の大きいホールスラストが上記の通り志向される傾向にある。表2に示す通り、欧米露にて全電化衛星への搭載が計画されているホールスラストが開発されているが、いずれも4.5kW級のO/Rモードのほか、3kW級のNSSKモードを装備している。更なる高機能化として、2500s前後の高Ispを達成すべく、放電電圧を標準的な300~400Vから引き上げ、800Vとする開発もPPUを含めて進められている。また、全電化衛星の課題である長期の遷移期間の短縮を実現する高推力化へ向けた研究も行われている<sup>4)</sup>。

表1 各国の静止電気推進バス

開発元	衛星/バス名	搭載電気推進	打上時質量	発生電力	ステータス	遷移期間
Boeing (米)	702SP	イオンエンジン XIPS-25	2 ton	8 kW	実証済 2015 初フライト	6 ヶ月
USAF (LM) (米)	AEHF (A2100M) 化学/電気双方で O/R	ホールスラスタ XR-5	6 ton	不明	実証済	
LM (米)	A2100	ホールスラスタ XR-5	3 ton 5 ton <sup>※1</sup>	10 kW 20~25 kW <sup>※1</sup>	開発中	3 ヶ月 (目標)
SSL (米)	SSL 1300	ホールスラスタ SPT or PPS	~5 ton	~25 kW	開発中 2018 初フライト	3 ヶ月 (目標)
OHB (欧)	Electra	ホールスラスタ 5kW 級, 型式 TBD	3 ton	10 kW	開発中 2021 初フライト	
TAS (欧)	Spacebus Neo	ホールスラスタ PPS-5000	3.5 ton	16 kW 以上	開発中 2019 初フライト	
Airbus DS (欧)	Eurostar E3000 EOR	ホールスラスタ PPS-5000/SPT-140	3.5 ton	13 kW	開発中 2017 初フライト <sup>※2</sup>	4 ヶ月
	Eurostar Neo	ホールスラスタ PPS-5000	3~6 ton	~30 kW <sup>※1</sup>	開発中	100 日 (目標)
RSCC (ロシア)	Express-2000	ホールスラスタ SPT	3.4 ton	14 kW	不明	
中国航天	DFH-4SP	不明	2~2.5 ton	9 kW	開発中	

※1 公表されたペイロード電力から推測。

表2 全電化衛星用電気推進

開発元	スラスタ名	電力	推力	推力電力比	比推力	放電電圧	カソード
Aerojet (米)	XR-5 ホールスラスタ	4.5 kW	290 mN	64 mN/kW	1790 s	300 V	BaO/W
		3.0 kW	170 mN	57 mN/kW	1920 s	400 V	
		2.0 kW	117 mN	59 mN/kW	1858 s	400 V	
Snecma (仏)	PPS-5000 ホールスラスタ	2~5 kW	100~325 mN	46~60 mN/kW	1730~ 2350 s	300~ 800 <sup>※V</sup>	LaB <sub>6</sub>
Fakel (露)	SPT-140 ホールスラスタ	4.5 kW	290 mN	64 mN/kW	1770 s	300 V	LaB <sub>6</sub>
		3.0 kW	193 mN	64 mN/kW	1680 s	300 V	
	SPT-140D ホールスラスタ	4.5 kW	290 mN	64 mN/kW	1770 s	300 V	
		4.8 kW	180 mN	38 mN/kW	2750 s	800 V	
(参考) L3C (米)	XIPS-25 イオンエンジン	4.5 kW	168 mN	37 mN/kW	3,500 s	-	BaO/W
		2.2 kW	79 mN	36 mN/kW	3,400 s	-	

※文献を基にした推算。

### 3. 戦 略

前述の通り、全電化衛星には世界的に4.5kWホールスラスタが搭載され、すでにSPT-140(露)、PPS-5000(欧)、XR-5(米)により市場は占拠されつつある。一方、我が国の宇宙開発の自在性・自立性の確保と宇宙産業の維持・強化を図る上では、全電化技術は日本として保持すべき中核技術である。そこで、2021年打上げ予定の次期技術試験衛星により、国産ホールスラスタサブシステムを軌道上実証することで、早期に海外ホールスラスタの技術水準(表2)まで到達し、着実に衛星システムとしての国際競争力を獲得する。

さらに、次期技術試験衛星用ホールスラスタを確実に開発した上で、ホールスラスタの国際市場に割って入るべく、海

外ホールスラスタとの差別化を図るための研究開発、すなわち高比推力/高推力双方を達成する高作動範囲を有するスラスタシステムの開発等を並行して進める方針とする。

### 4. ホールスラスタサブシステム

以下、次期技術試験衛星に搭載予定のホールスラスタサブシステムについて解説する。図2にホールスラスタサブシステムの構成を示す。ホールスラスタサブシステムは、ホールスラスタモジュール(HTM)、電力制御器(PPU)、流量制御器(FCM)、および推薬供給系から構成される。本稿では主として推薬供給系を除くコンポーネントについて概観する。

**4.1 ホールスラスタモジュール** ホールスラスタモジュール (HTM) は、スラスタヘッド、ホローカソード、放熱板、ブラケットにより構成される。設計の特徴としては、高い性能が得られているセンターカソードを採用し、ホローカソードのインサートには、将来的な大電流作動も見据え、LaB6 (六ホウ化ランタン) を選定した。2017年1月現在実施中のスラスタヘッドおよびホローカソードのBBM試験 (JAXA 相模原キャンパスおよび Georgia Institute of Technology: GIT にて実施) を通し、基本構成、主要諸元、性能保証値などを決定する計画である。

**4.2 電力制御器** 電力制御器 (PPU) は、図2にも示した通り、衛星バス電源系からの電力供給を受け、アノード、コイル、キープ、ヒータ、流量制御器への電力供給を行う。さらに、ホールスラスタモジュールの制御、監視、異常判定を行うとともに、衛星バス制御系とのインタフェースを有し、コマンド・テレメトリ処理機能を有する。2017年1月現在、BBMの設計を進めているところである。

**4.3 流量制御器** 流量制御器 (FCM) は、推進剤供給系にて所定の圧力に調圧されたキセノンガスを、流量制御した上でスラスタヘッドおよびホローカソードへ供給する。流量制御の方式としては Proportional Control Valve 方式と Thermo-throttle 方式がある。前者は主に米にて、後者は主に欧露にて実績がある。両者の特質を踏まえ、現在機種選定を進めている。

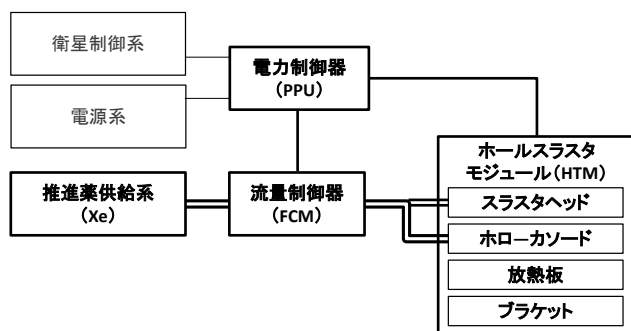


図2 ホールスラスタサブシステム (図中太枠部)

## 5. 開発計画

2021年の次期技術試験衛星打上げに向けたホールスラスタサブシステムの開発計画について、以下試験計画を中心に説明する。

**5.1 大型試験設備新設** ホールスラスタモジュールは前述の通りJAXA相模原キャンパスおよびGITの試験設備を用い開発を進めているが、相模原キャンパスのみならず国内の現存設備では6kW級の試験には排気能力及び徐熱能力が不足しており、スラスタの動作範囲が制限されてしまう。そこで現在、大型の試験設備の建設準備を進めており、相模原キャンパスに2017年11月に完成予定である。図3に設備の構想図を示す。設計の結果、長さ8m、直径3mとし、はやぶさの開発で実績のある汎用クライオポンプ (U30H) 多数台にて

構成することとした。シュラウド冷却は運用コスト低減の観点から、LN2、フロンを排し、水冷とした。バックスパッタ低減やポンプ保護等のため、コニカルビームターゲット、ポンプ保護フィンを設ける。

**5.2 ホールスラスタモジュール試験** ホールスラスタモジュールは相模原キャンパス (既存設備及び新設設備)、およびGIT設備の3設備を有効に活用し、効率的に開発を進める。BBMフェーズでの主要諸元決定の後、次期技術試験衛星システムからの要求に基づき耐久試験を実施する。

**5.3 PPU/HTM噛合せ試験** PPUとHTMのうちスラスタヘッド、カソード、流量制御器との噛合せにより、各種インタフェース適合性 (EMC含む)、電流振動耐性、異常判定/復旧機能等を確認する。耐久試験後にEOL状態のスラスタ (チャンネルやカソード損耗後) との噛合せも実施し、ミッションを通じたI/F適合性を保証する計画としている。

**5.4 EMI試験** スラスタヘッドおよびカソードからREとPPUの干渉確認のため、EMI試験を実施する。電波暗室内でのスラスタ作動が必要となるが、国内には実施可能な装置が現状では存在しないため、既存米国設備の借用もしくは国内に試験装置を整備することを検討中である。

**5.5 End-to-End試験** はやぶさ1、はやぶさ2、DS-1 (NASA, NSTARイオンエンジン搭載)、SMART-1 (ESA, PPS-1350ホールスラスタ搭載) では、打上げ前の最終機能確認として、電気推進スラスタを衛星に搭載した状態でのビーム噴射試験 (End-to-End試験) を実施している<sup>9)</sup>。はやぶさでは上記試験にて潜在する不具合が抽出され、対策が為された。ホールスラスタは日本としては初の実機搭載であり、End-to-End試験による潜在リスクの抽出が必須である。現在、試験場所等について検討中である。設備への負荷低減のため、スラスタの低出力作動や設備の適切な保護などについても考慮が必要となる。

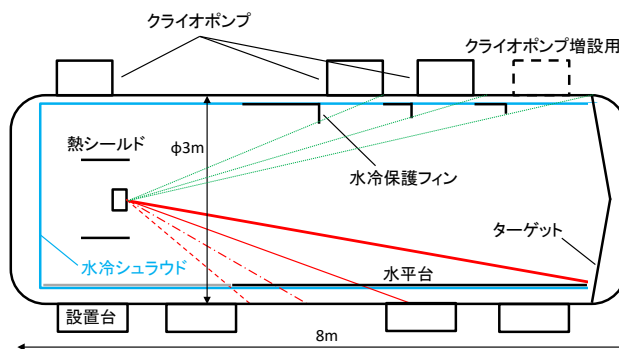


図3 新設大型試験設備

## 6. 開発課題

ホールスラスタサブシステムの主たる開発課題を表3にまとめると。

表3 開発課題

課題	リスク	対応策
耐久試験スケジュール	開発スケジュールに適合した耐久試験計画の立案	試験設備併用 解析支援
クラスタ干渉	クラスタ化によりHTM特性が変化	地上試験検証
ロールトルク	ロールトルクにより、意図しない姿勢擾乱が発生	解析による事前評価 軌道上でのデータ収集
軌道上性能	地上試験で取得した性能と軌道上性能に差異	地上試験結果からの外挿予測 システムマージンの確保
ブルーム影響	噴射ブルームが衛星本体へ影響を及ぼす	地上試験/解析による評価 軌道上でのデータ収集（プローブ等）

## 7. まとめ

- 世界的に全電化衛星の実証が進む見込み。
- 2021年打上げの次期技術試験衛星にて、6kW級国産ホールスラスタを実証し、この流れに早期にキャッチアップする。
- 従って、次期技術試験衛星用ホールスラスタには、海外スラスタと同等水準を要求とし、衛星システムの競争力を着実に獲得する。
- 一方、ホールスラスタ市場にも食い込むべく、獲得した技術を発展させ、海外ホールスラスタとの差別化を図るための研究開発を平行して進める。
- 開発効率化のため、海外設備を有効に活用しつつ、国内に大型試験設備を新設し、耐久試験等に供する。
- 国内初のホールスラスタミッションであることから、End-to-End試験を通じた衛星システムレベルでの実証を行い、リスク低減を図る。

## 謝 辞

本稿執筆にあたり多大なご協力をいただいた、IA/IHI ホールスラスタ研究開発担当各位、およびJAXA 次期技術試験衛星プリプロジェクトチーム各位に謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 杵淵：全電化衛星の世界動向，JSASS-2016-4130，第60回宇宙科学技術連合講演会，函館，2016年9月。
- 2) 鳩岡，他：次期技術試験衛星によるオール電化衛星の開発，JSASS-2016-4131，第60回宇宙科学技術連合講演会，函館，2016年9月。
- 3) 田代，他：全電化衛星向けホールスラスタの開発状況，JSASS-2016-4132，第60回宇宙科学技術連合講演会，函館，2016年9月。
- 4) M.Yu. Potapenko1, V.V. Gopanchuk, D.V. Merkuriev, P.G. Smirnov, “Experimental study of a high specific impulse plasma thruster PlaS-120CM,” IEPC-2015-154.
- 5) 國中，西山，中山：イオンエンジンによる動力航行，コロナ社，2006。